

El uso de los sensores activos en la gestión medioambiental: evaluación de daños por incendios con datos Sentinel-1

Victoriano Moreno Burgos
COFIS

Carmelo Alonso Jiménez
Indra Espacio





- 1 —** Introducción

- 2 —** Metodología
 - Misión espacial Sentinel-1
 - Métodos de análisis: coherencia
 - Descripción de la metodología

- 3 —** Resultados

- 4 —** Conclusiones



01

Introducción





Observación de la Tierra Espacial

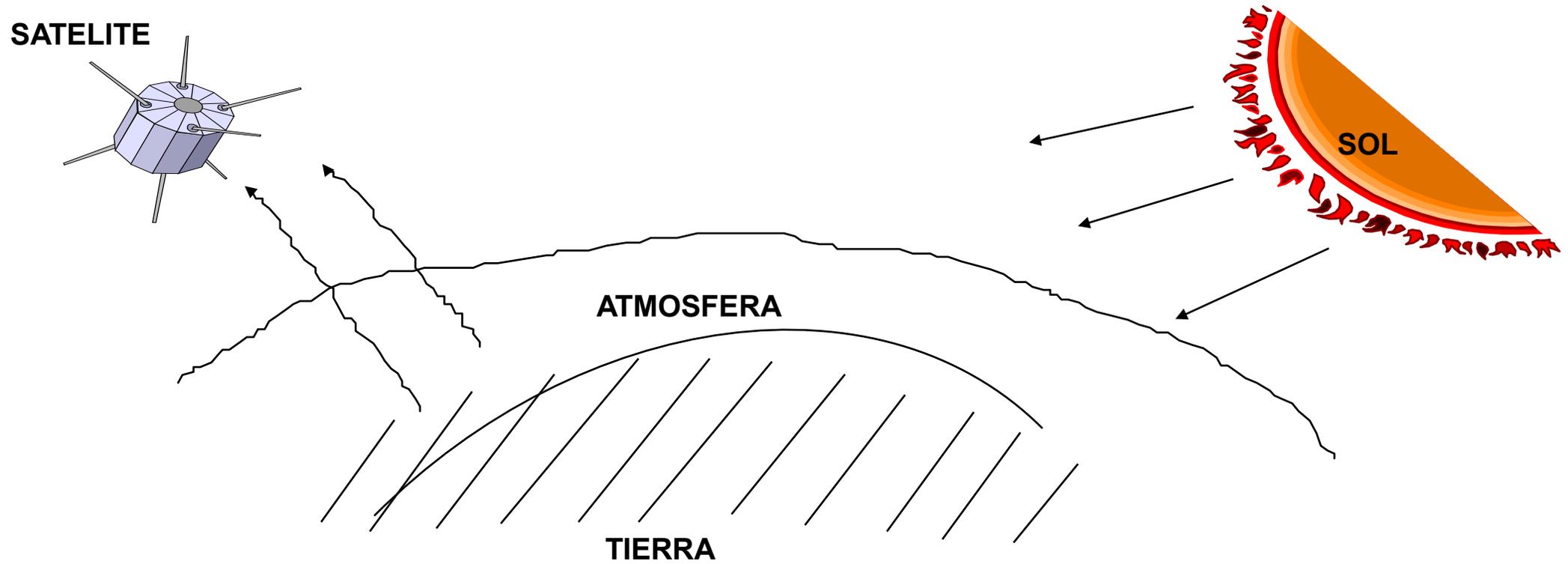
La Observación de la Tierra desde el espacio mediante sensores activos, como el radar, ha revolucionado la gestión del medioambiente, proporcionando herramientas avanzadas para evaluar y mitigar los daños causados por desastres naturales.

Un ejemplo significativo de esta tecnología es el uso del radar de apertura sintética (SAR) desde satélite, que ofrece capacidades superiores para el monitoreo de la superficie terrestre en diversas condiciones atmosféricas y de iluminación.

EL uso de esta tecnología SAR se ha utilizado para monitorizar en detalle el daño causado por un incendio forestal, concretamente los datos SAR captados por el satélite europeo Sentinel-1



Observación de la Tierra Espacial





Observación de la Tierra Espacial

Elementos que intervienen en la Observación de la Tierra:

- Los sensores activos y pasivos
- La fuente de radiación
- La atmosfera
- El objeto



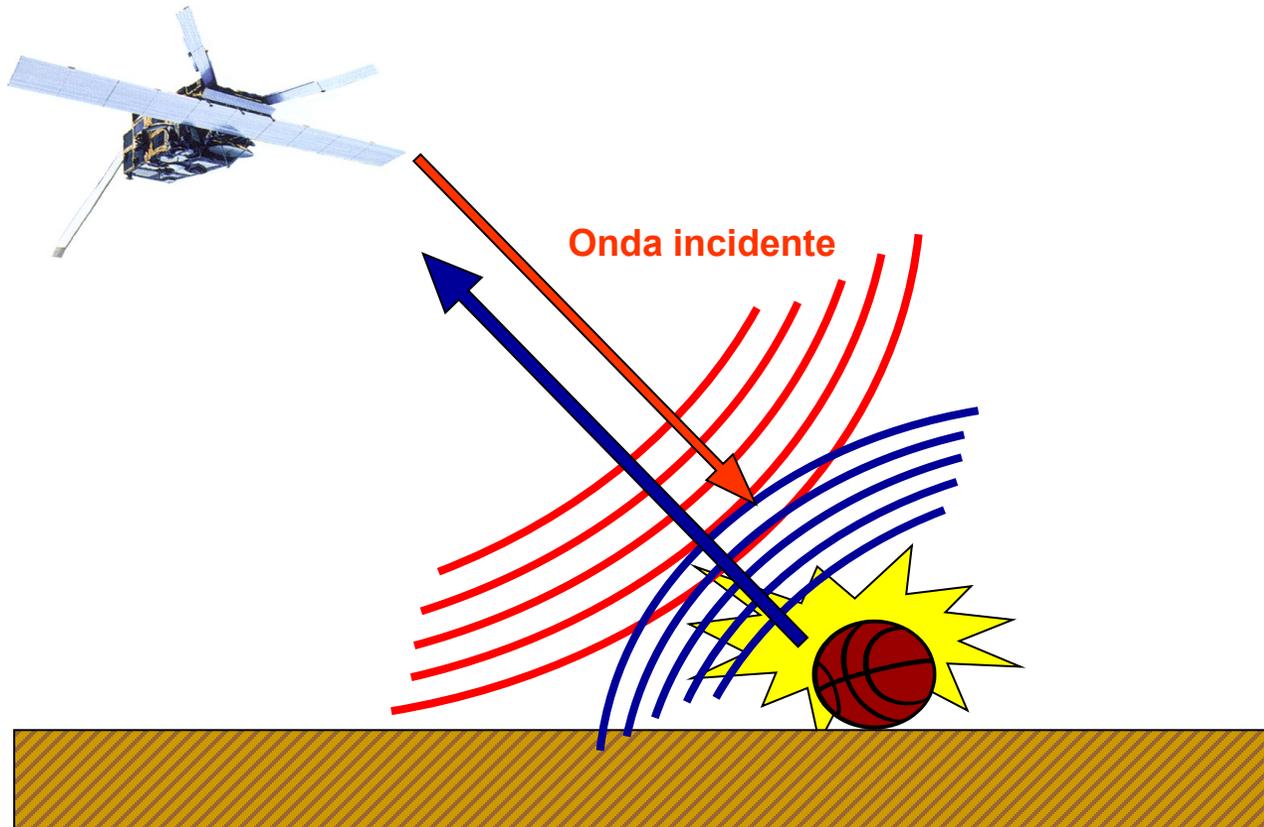
Sensores pasivos



Un sensor pasivo que necesita una fuente de iluminación externa



Sensores Activos

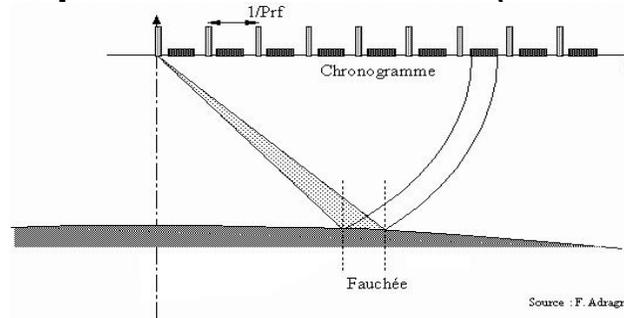


Un sensor activo que incorpora su propia fuente de iluminación



Sensores Activos

Un radar de apertura sintética **transmite pulsos de microondas (sinusoides de frecuencia modulada),** a una frecuencia **de repetición (PRF)** o incluso en **ráfagas** (grupos de pulsos cortos) (**BRF**) ;



Recibe los ecos en números complejos (conservando la información de fase y los desplazamientos Doppler),

Cada **objetivo** se ve desde **varias posiciones de satélite**. Esto permite crear una **antena sintética larga** y una **alta resolución espacial** de los objetivos terrestres,

La formación de imágenes SAR explota la **Potencia**, el **Retardo**≡**Rango** y la **Frecuencia Doppler** de los ecos devueltos,

La antena SAR ilumina sólo 1 lado (Figura) para evitar la mezcla de ecos (Izquierda / Derecha).

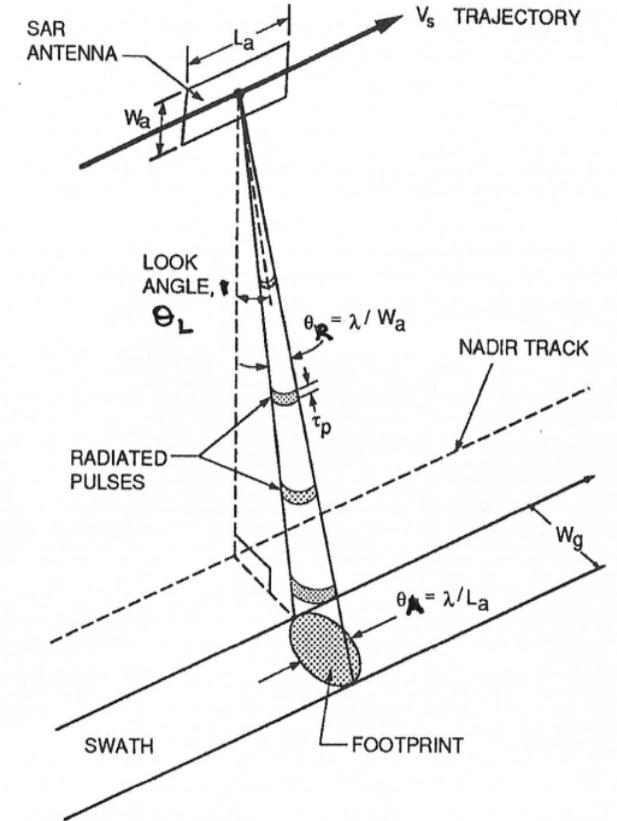


Figure 1.6 Simplified geometry of a side-looking real-aperture radar (SLAR).
source: Curlander (book)



Sensores Activos



Imagen de un entorno rural urbano y agrícola tomada por el satélite PAZ



Sensores Activos

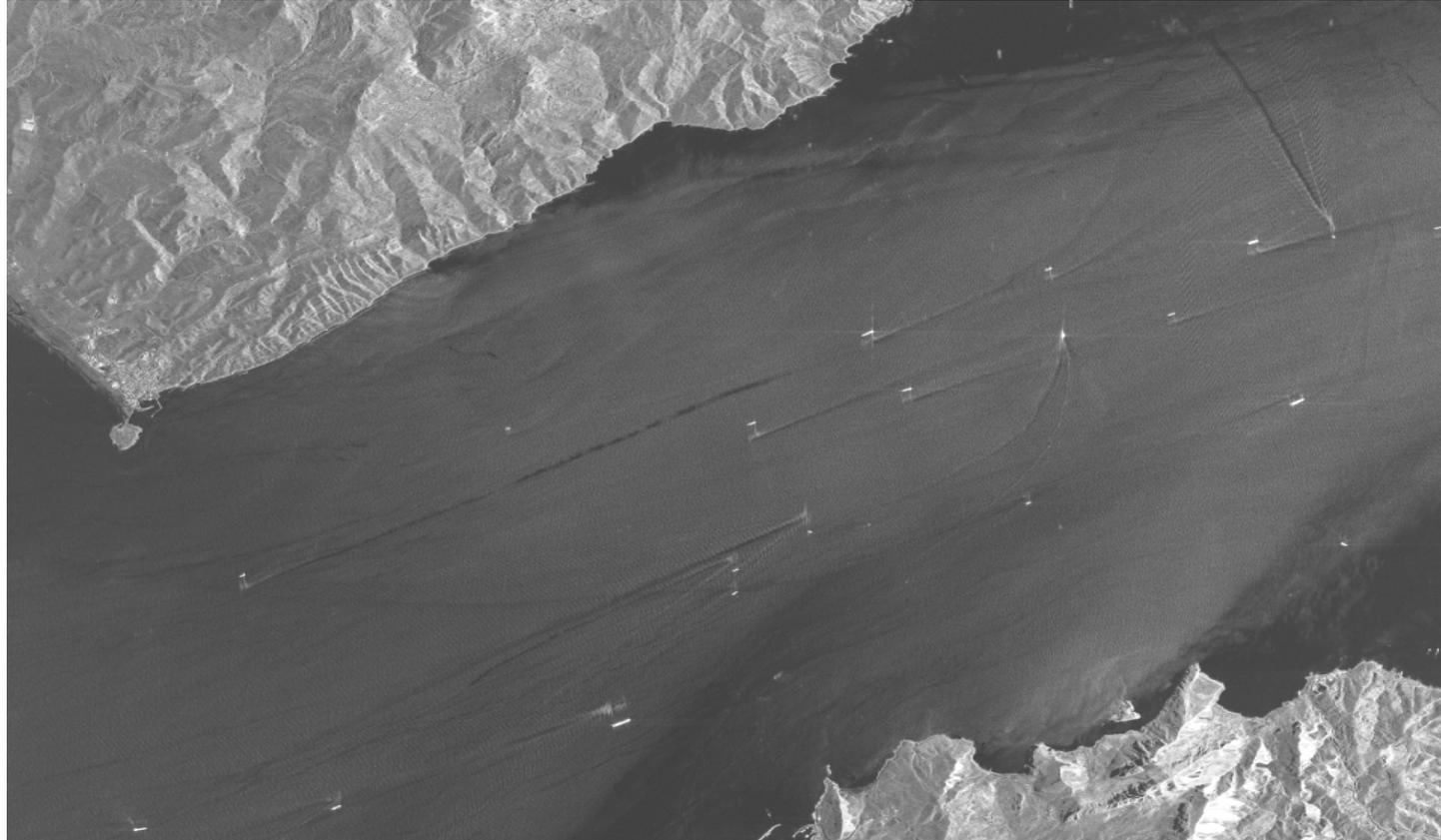


Imagen de un entorno costero y marino tomada por el satélite TerraSAR X



02

Metodología

Misión espacial Sentinel-1

Métodos de análisis: coherencia

Descripción de la metodología





Sentinel-1 - Resumen de la misión

S1B : lanzado el 25 de abril de 2016, fallo el 23 de diciembre de 2021

S1A : lanzado el 3 de abril de 2014, plenamente operativo :

Ciclo de revisita : 12 días ecuador (175 órbitas / ciclo)

Ciclo de revisita : 6 días ecuador (cuando se lance el S1C)

Instrumento C-SAR : capacidad de formación de imágenes en todo **momento y en cualquier condición meteorológica** :

Banda C : 5,405 GHz → longitud de onda = ~5,547 cm





Sentinel-1 - Resumen de la misión

- La banda C es adecuada para la vigilancia de zonas de hielo marino, vigilancia marina (pesca ilegal, comportamientos anómalos, vertidos de petróleo / mareas negras),
- Interferometría : **movimiento del terreno en mm** detectable en amplias zonas, utilizado **en situaciones de crisis** (inundaciones, corrimientos de tierras, terremotos, erupciones volcánicas) y para controlar el hundimiento urbano debido a las obras de construcción o al clima, el hundimiento del terreno relacionado con la industria minera,
- doble polarización (+interferometría): seguimiento de la **agricultura, la silvicultura** y la clasificación de la superficie terrestre, **cartografía de las aguas interiores**, cartografía de los bosques quemados (y seguimiento del ciclo de vida del carbono),



Sentinel-1 Modos de funcionamiento de los instrumentos CSAR

DIRECCIÓN DE ANTENA:

- 4 modos de funcionamiento exclusivos (diapositiva siguiente) : SM, IW, EW, WM

POLARIZACIÓN DE LA ANTENA:

- 2 polarizaciones exclusivas de transmisión (Tx): vertical (V) u horizontal (H) (diapositivas posteriores)
- 2 polarizaciones de recepción (Rx) no exclusivas (V, H),
- La combinación Rx Tx da :
 - (HH,HV) o HH : utilizado sobre las zonas polares de hielo marino,
 - (VV,VH) o VV en otras zonas excepto el Mar Báltico (H) parcialmente.



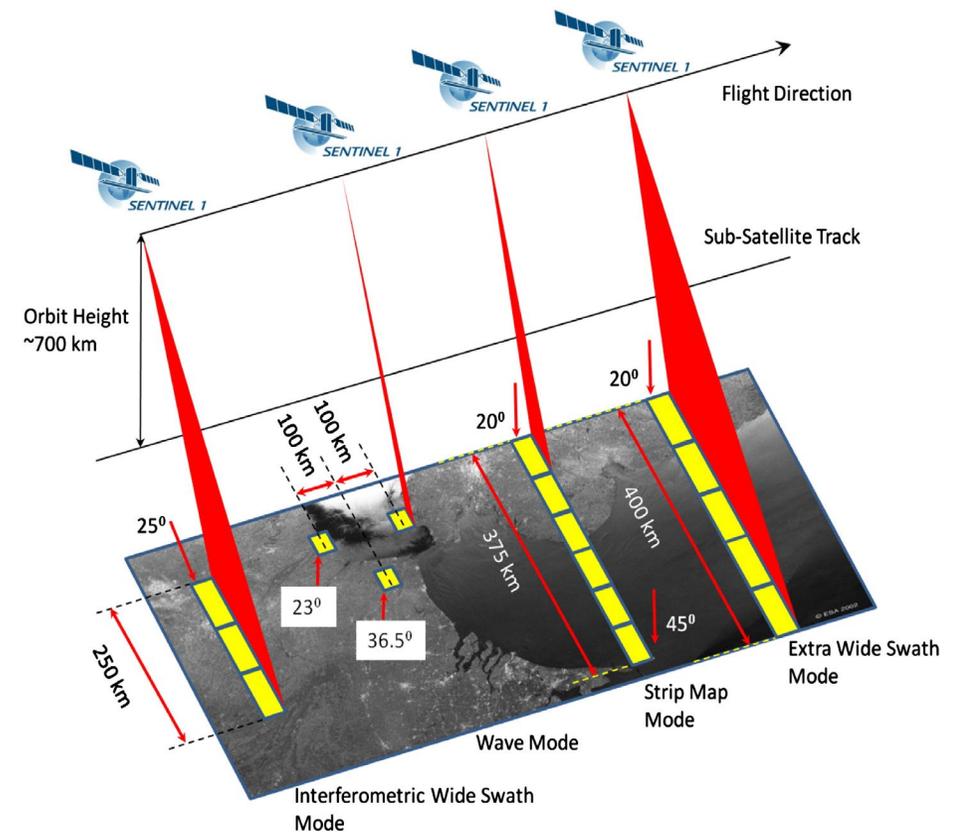
Sentinel-1 Modos de funcionamiento de los instrumentos CSAR

Modo Mapa de franjas (SM) : 6 franjas estrechas exclusivas de 80km de subfranjas y máxima resolución (5m x 5m). Continuidad con ERS, Envisat.

Modo interferométrico Wide swath (IW) : franja de 250km con resolución geométrica moderada (5m x 20m) y 3 sub-ranuras "adyacentes" adquiridas con la técnica TOPSAR (ver sesión S1 más adelante).

Modo Extra Wide swath (EW) : similar a IW pero 5 sub-swaths en lugar de 3 -> mayor velocidad de dirección del haz acimutal y menor resolución (20m x 40m). Los modos IW y EW también pueden utilizarse para interferometría.

Modo Onda (WM): una serie de imágenes SM de 20 km x 20 km, adquiridas alternativamente en 2 ángulos de incidencia cada 100 km. Las imágenes con el mismo ángulo de incidencia están separadas 200 km. Se utiliza para obtener la dirección, la longitud de onda y la altura de las olas oceánicas.





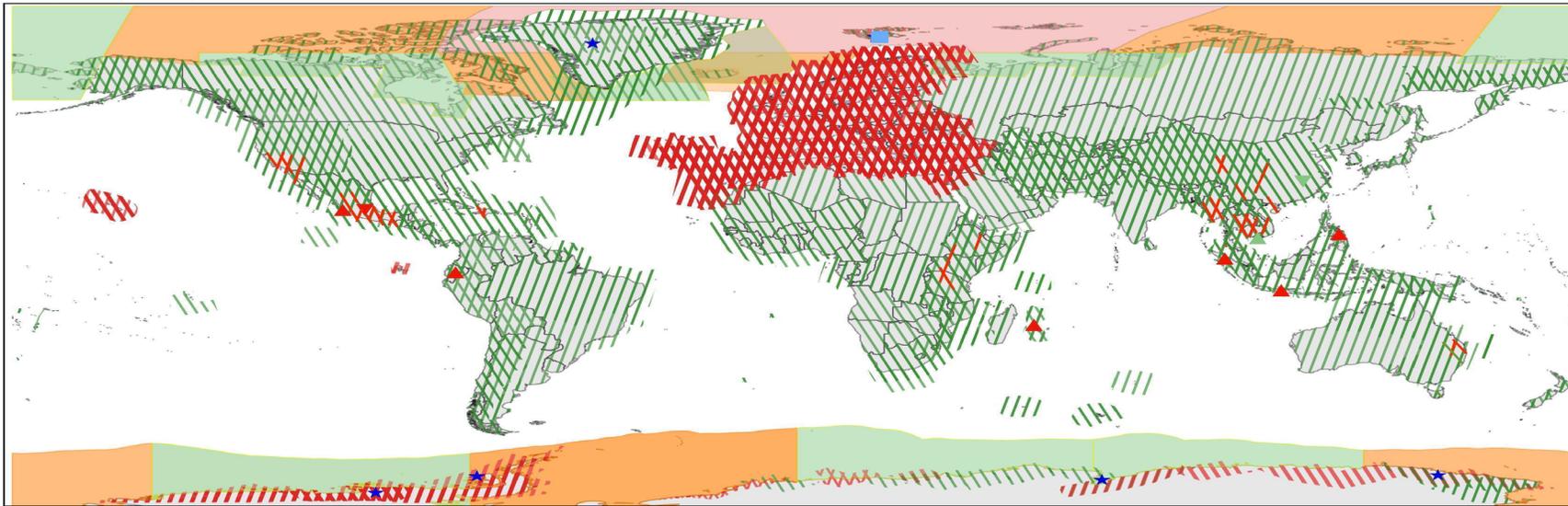
Sentinel-1: planificación de adquisición de imágenes

Sentinel-1 Constellation Observation Scenario: Repeat & Coverage Frequency



validity start: 11/2021

Note: Seasonal campaigns not represented
Note: Wave mode systematically operated over open oceans not represented



PASS	REPEAT	FREQUENCY **	COVERAGE	FREQUENCY **	REFERENCE DATA SITES (6d repeat)
<ul style="list-style-type: none"> ASCENDING DESCENDING 	<ul style="list-style-type: none"> 6 days 12 days 	<ul style="list-style-type: none"> 1 days 1-3 days 2-4 days 	<ul style="list-style-type: none"> Highly active volcanism Fast subsidence Short growth cycle, intensive agriculture Fast changing wetlands Fast moving outlet glaciers Permafrost & glaciers 		

* coverage ensured from same, repetitive relative orbits
** coverage considering passes from all (asc & desc) orbits



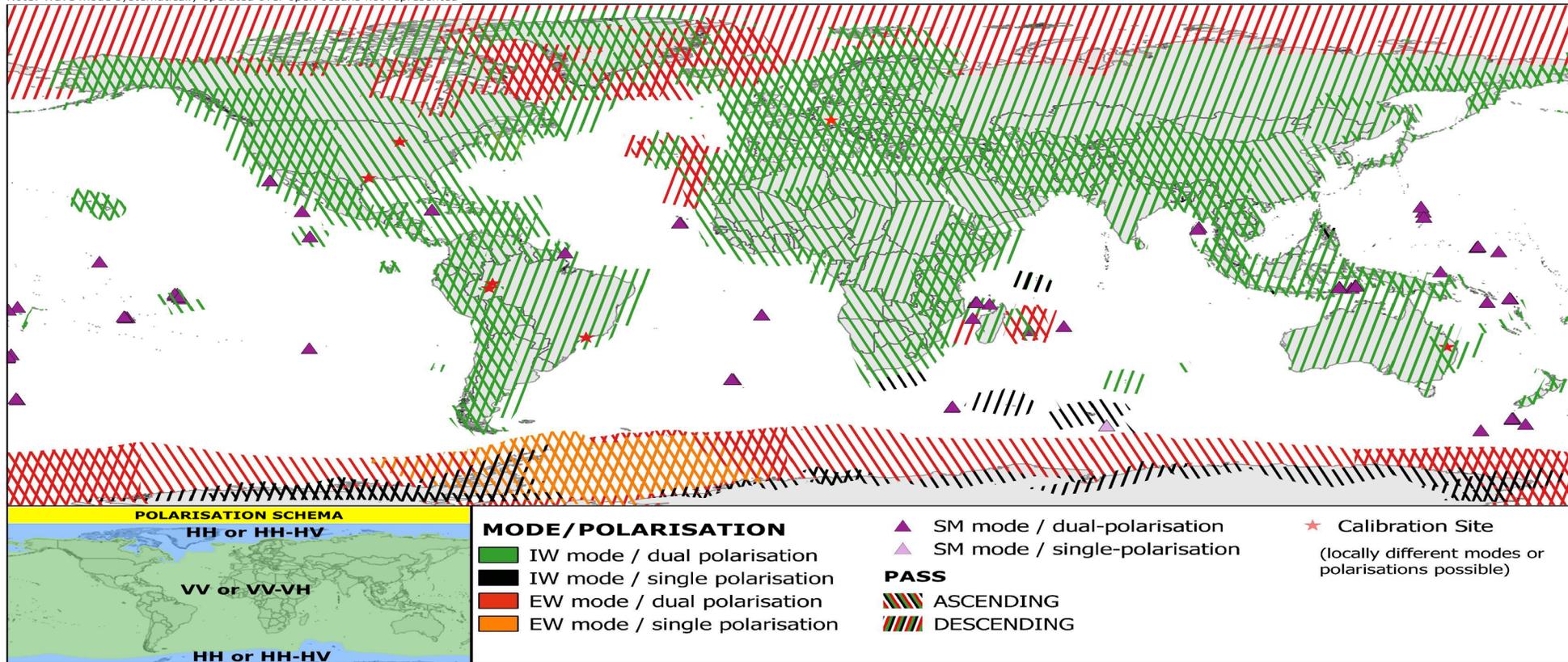
Sentinel-1 Modos de funcionamiento de los instrumentos CSAR

Sentinel-1 Constellation Observation Scenario: Mode - Polarisation - Observation Geometry



validity start: 11/2021

Note: Seasonal campaigns not represented
Note: Wave mode systematically operated over open oceans not represented





Sentinel-1: Aplicaciones de las imágenes

Applications	Acquisition Mode														Product Type		
	SM				IW				EW				WV		SLC	GRD	OCN
	SH	SV	DH	DV	SH	SV	DH	DV	SH	SV	DH	DV	SH	SV			
Arctic Environment and Sea-Ice Zones Monitoring					✓		✓		✓		✓				✓	✓	
Open Ocean Ship Surveillance	✓						✓	✓			✓	✓				✓	
Oil Pollution Monitoring							✓	✓			✓	✓				✓	
Marine winds					✓	✓			✓	✓				✓		✓	✓
Forestry			✓	✓			✓	✓							✓	✓	
Agriculture			✓	✓			✓	✓							✓	✓	
Urban deformation mapping		✓	✓	✓											✓	✓	
Flood monitoring	✓					✓	✓	✓							✓	✓	
Earthquake analysis	✓			✓											✓		
Landslide and volcano monitoring		✓	✓	✓		✓	✓	✓							✓		



Sentinel-1 CSAR: Niveles de producto SAR

Nivel 0

Datos brutos SAR comprimidos desenfocados (parecen ruido) → para usuarios expertos, requiere disponer de un procesador SAR.

Nivel 1

Complejo de aspecto único (SLC) :

Datos SAR focalizados geo-referenciados, en **geometría (Zero-Doppler, Slant-Range)**, en muestras con valores **complejos** preservando la **información de fase y el ancho de banda completo de la señal de transmisión**. Utilizados en interferometría o relacionadas con Doppler (viento oceánico de 10 m, corriente de oleaje, movimiento del objetivo...).

Alcance terrestre detectado (GRD) derivado del SLC :

- Detectado == Sólo amplitud → **Información de fase perdida**,
- multimirada (se promedian las imágenes de las bandas espectrales) + proyectada sobre el terreno (UTM + WGS84) :
 - ventajas : **menor ruido de Speckle**, la imagen está **en proyección cartográfica**,
 - contrapartida : **resolución geométrica degradada**.

Nivel 2

- 3 partes : Espectros de oleaje oceánico (OSW), campos de viento oceánico (OWI) y velocidades radiales en superficie (RVL).



Sentinel-1 Espaciado entre píxeles y resolución de L1B GRD

Mode	Resolution rg x az	Pixel spacing rg x az	Number of looks	ENL
SM	9x9 m	3.5x3.5 m	2x2	3.7

Cuadro resolución completa del producto L1 GRD (FR)

Mode	Resolution rg x az	Pixel spacing rg x az	Number of looks	ENL
SM	23x23 m	10x10 m	6x6	29.7
IW	20x22 m	10x10 m	5x1	4.4
EW	50x50 m	25x25 m	3x1	2.7

Cuadro de alta resolución del producto L1 GRD (HR)



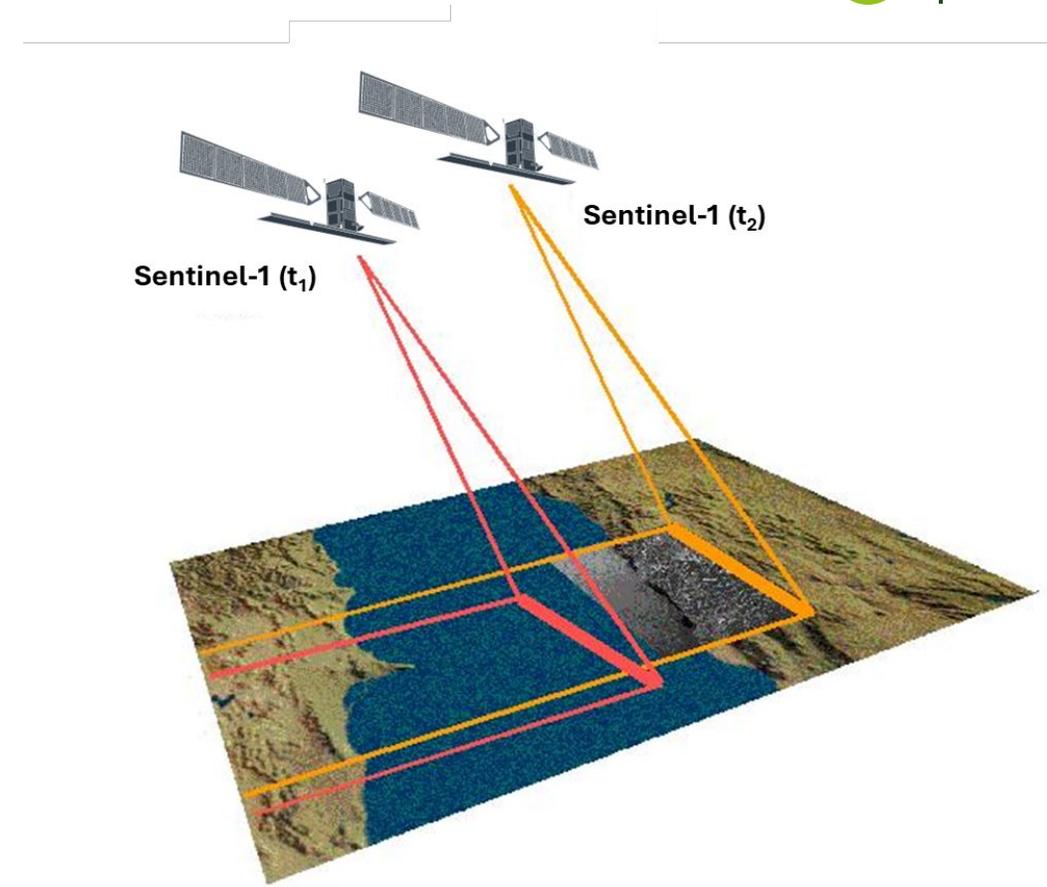
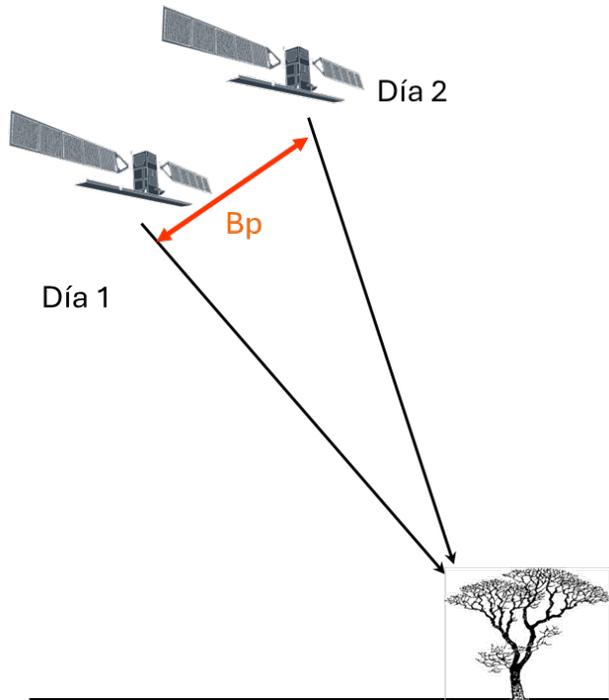
Sentinel-1 Espaciado entre píxeles y resolución de L1B GRD

Mode	Resolution rg x az	Pixel spacing rg x az	Number of looks	ENL
SM	84x84 m	40x40 m	22x22	398.4
IW	88x87 m	40x40 m	22x5	81.8
EW	93x87 m	40x40 m	6x2	10.7
WV	52x51 m	25x25 m	13x13	123.7

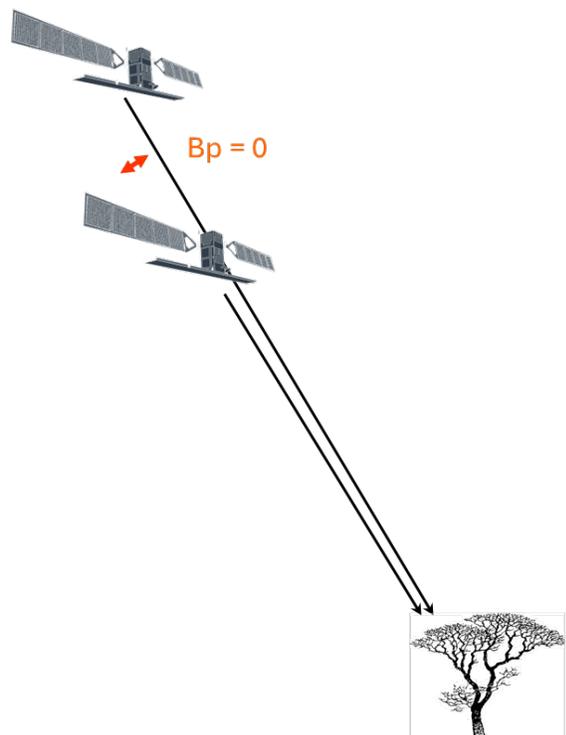
Cuadro de media resolución del producto L1 GRD (**MR**)



En el presente trabajo hemos utilizado **imágenes de coherencia**. Un producto derivado de las técnicas de **interferometría SAR**, en las que se utilizan dos imágenes radar de la misma zona (bien tomadas simultáneamente desde la misma plataforma o desde distintos satélites o en dos pasadas diferentes del mismo), que no son adquiridas desde el mismo punto del espacio, pues las repetidas órbitas no llegan a coincidir exactamente.

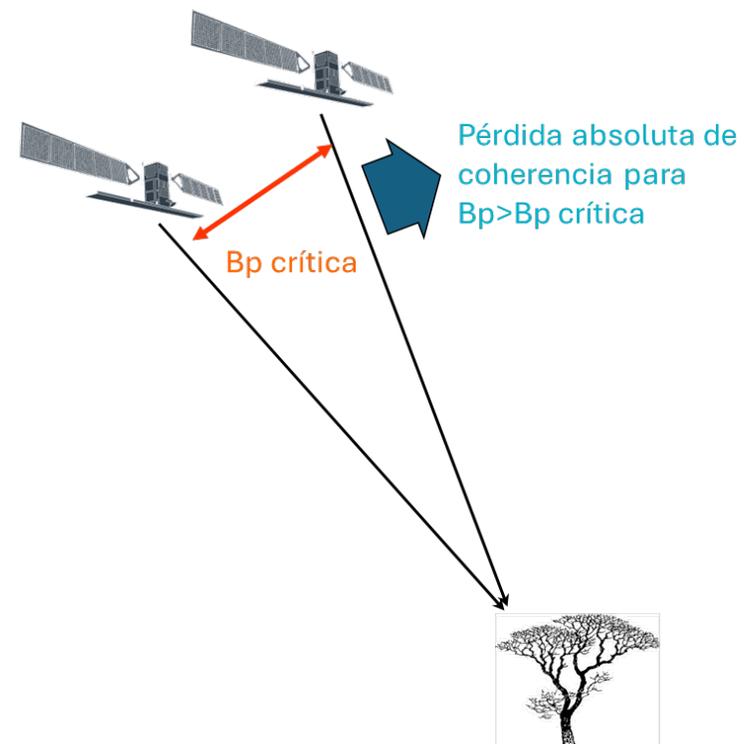


La distancia determinada por la separación que existe entre las órbitas puede variar desde varios metros hasta centenares o miles y se denomina línea de base, B_p . Este parámetro no debe ser superior a 300 m para que estas técnicas puedan aplicarse.



Cuando la línea de base se aproxima a cero, no se produce ninguna diferencia de reflectividad por variación de ángulo de incidencia. La reflectividad del primer día es idéntica a la del segundo día.

Coherencia $\rightarrow 1$



A partir de la línea de base crítica la fase interferométrica es puro ruido

Coherencia $\rightarrow 0$



La imagen de coherencia resultado de un par de imágenes Sentinel-1 SLC, I_1 e I_2 , se define con la siguiente expresión:

$$Coh = \frac{E[P_1 \cdot P_2^*]}{\sqrt{E[|P_1|^2] \cdot E[|P_2|^2]}}$$

Donde P_1 es un pixel de la imagen SAR tomada en t_1 y P_2 es el mismo pixel pero en la imagen tomada en t_2 y E es el operador **esperanza matemática**, que en la práctica se sustituye por el cálculo de la media sobre un área alrededor del pixel de interés, quedándose con el valor absoluto del resultado final.

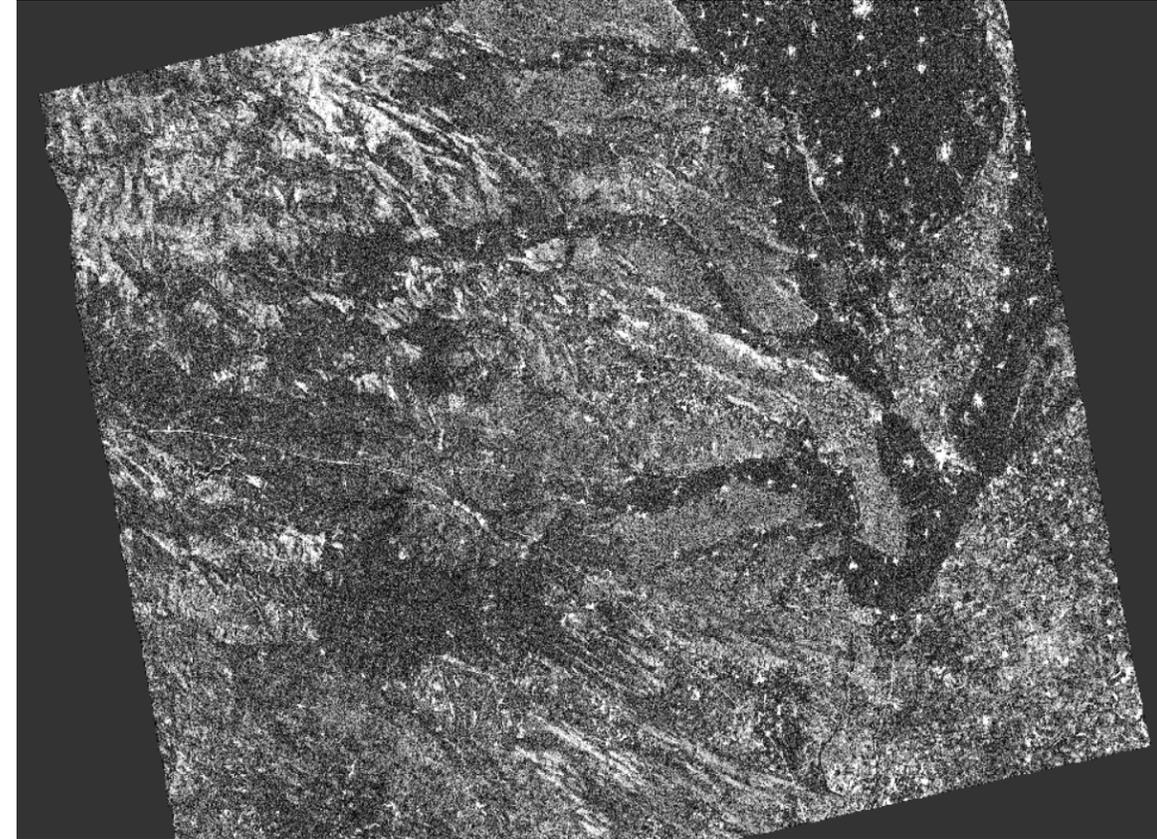
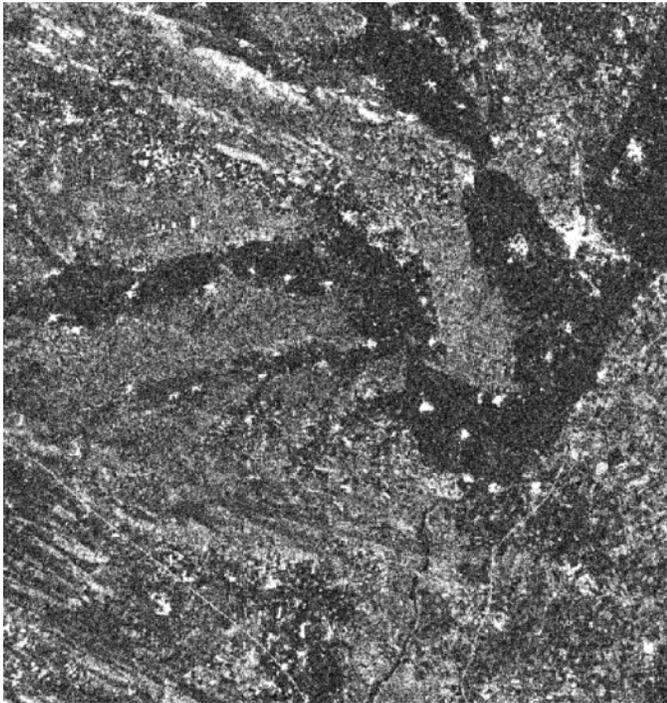


Imagen de coherencia entre el 25 de mayo y el 12 de julio

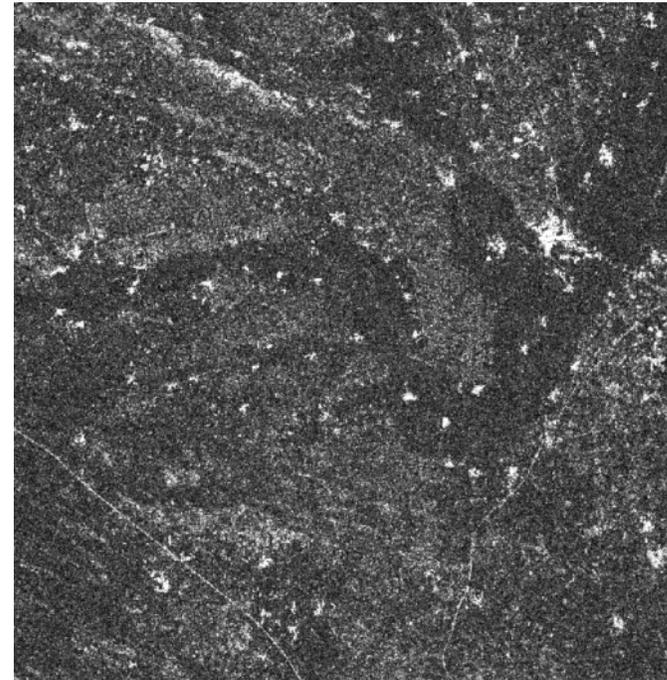


Los valores obtenidos de coherencia son traducidos a imagen, cuyos píxeles varían entre 0 (mala coherencia, color negro) y 1 (buena coherencia, color blanco).

Esta es la propiedad que permite detectar cambios. Si el valor de coherencia es cercano a 1 aparece en blanco en la imagen (núcleos urbanos, trenes y áreas estables iguales en ambas imágenes). Sin embargo, si es cercano a 0, se habrán producido algunos cambios y aparecerán como áreas negras en la imagen (cultivos, bosques, cambios en el uso del suelo,...).



Coherencia entre el 25 de mayo y el 12 de julio



Coherencia entre el 25 de mayo y el 29 de agosto



Caso de estudio: incendios de la Sierra de la Culebra (Zamora)

En el verano de 2022 tuvieron lugar dos grandes incendios en la sierra de la Culebra, en el noroeste de la provincia española de Zamora.

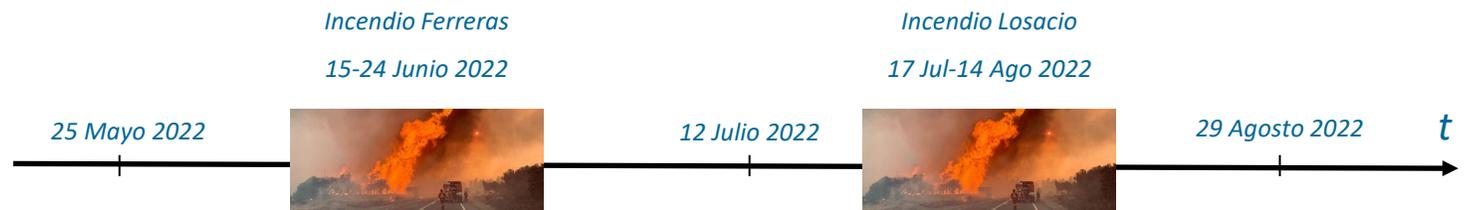
El primero de ellos se inició el 15 de junio entre los términos de Ferreras de Arriba y Sarracín de Aliste, y el segundo el 17 de julio en el término de Losacio.

El primero de los incendios fue controlado el 24 de junio de 2022, y el segundo el 14 de agosto de 2022.

La causa de ambos incendios fue un fenómeno de tormenta seca.



Medios de extinción actuando en el incendio de la Sierra de la Culebra (Fuente: Wikipedia)



Cronología de los incendios de la Sierra de la Culebra (Zamora) de 2022 y fechas de las imágenes utilizadas

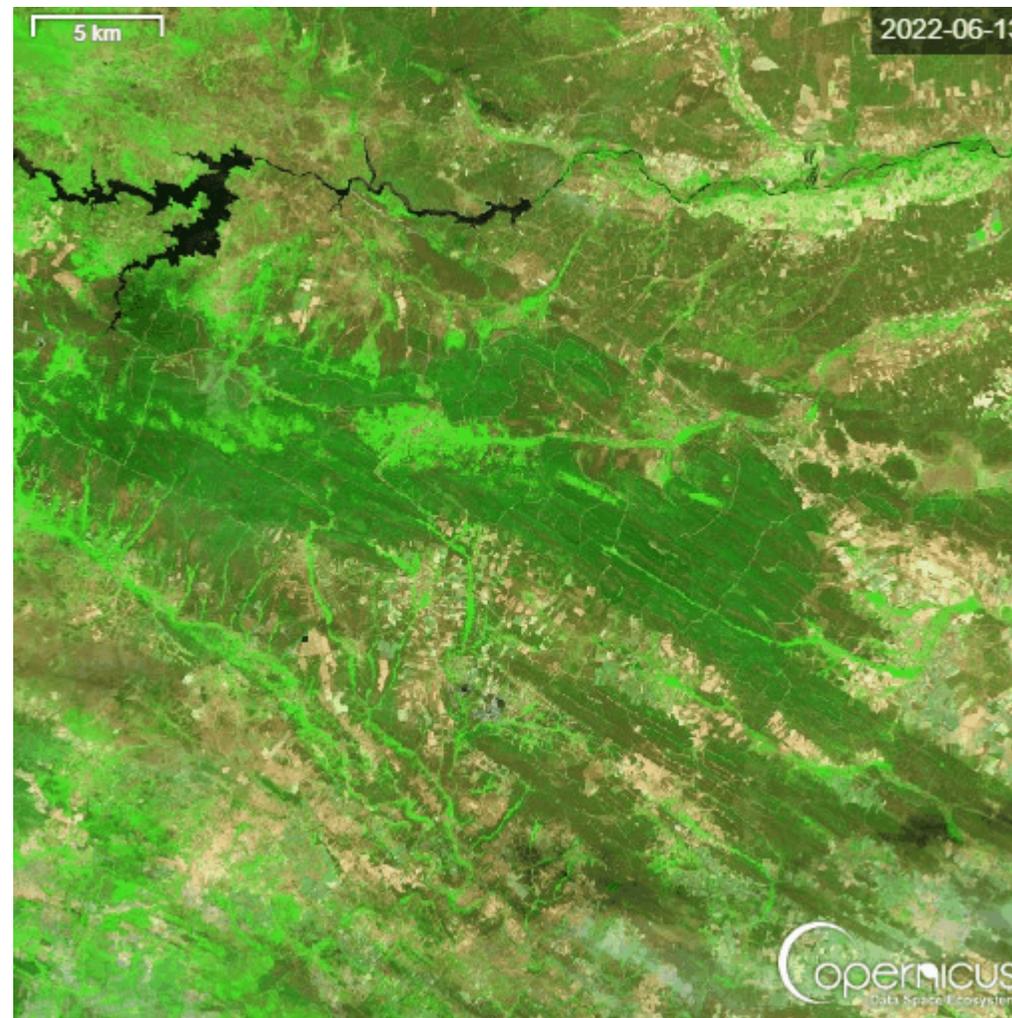


Caso de estudio: incendios de la Sierra de la Culebra (Zamora)

Las llamas se propagaron a lo largo de los términos de 52 localidades de las comarcas de Aliste, La Carballeda, Tábara, Tierra de Alba y Benavente y los Valles.

En el incendio de Ferreras, 29 670 hectáreas se vieron afectadas. En el incendio de Losacio, la superficie afectada ascendió a 35 960 hectáreas.

Se trata de los dos mayores incendios de la historia de Castilla y León, y dos de los más devastadores en España desde que se tienen registros.



Timelapse generado con el navegador de Copernicus Data Space Ecosystem utilizando las imágenes Sentinel-2 de la zona de estudio entre el 13/06/2022 y el 27/08/2022 (Fuente: CDSE)

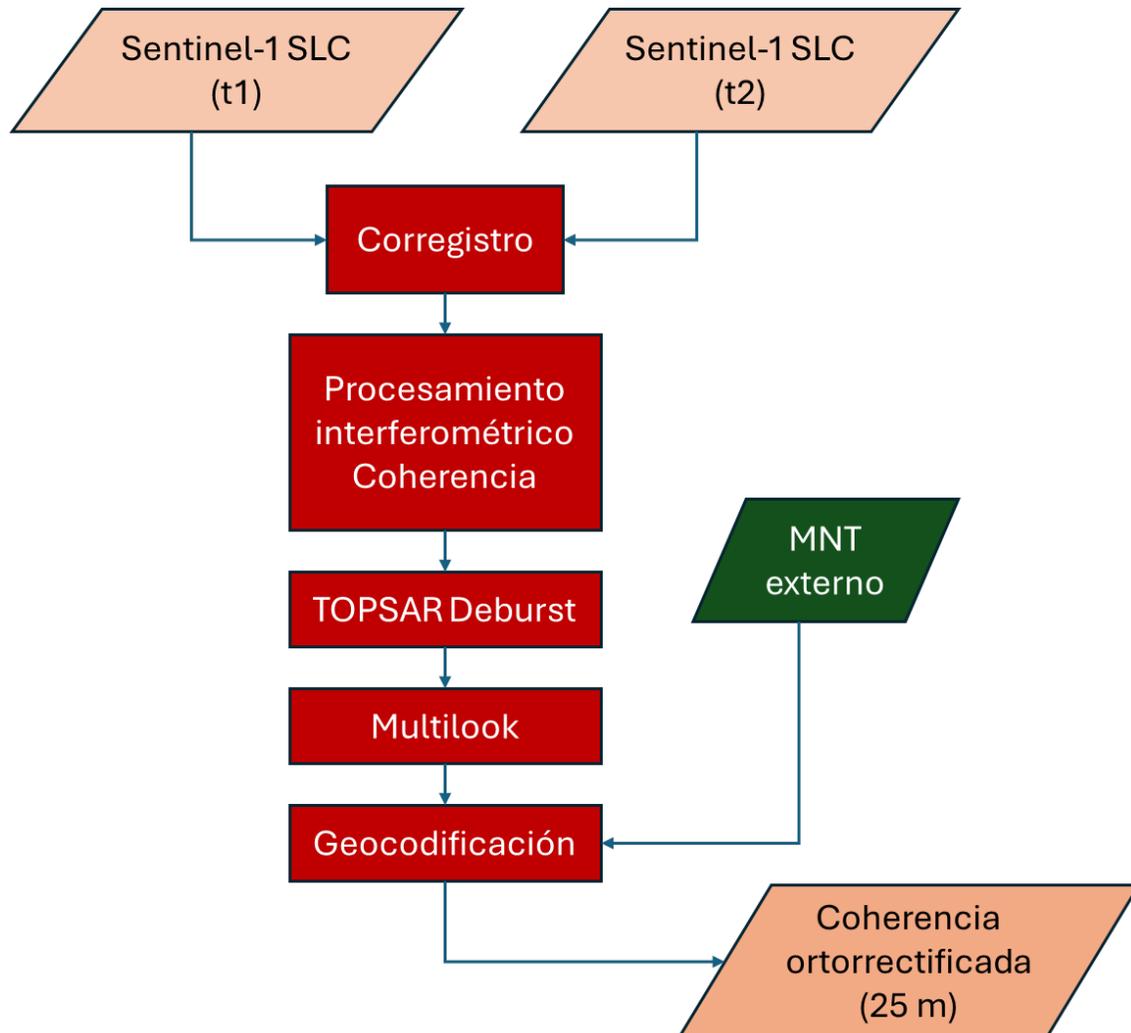


Se han utilizado 3 imágenes SLC de Sentinel-1^a que se han procesado con el software gratuito de la ESA: SNAP.



Nombre	Tipo	Fecha	Track	Órbita
S1A_IW_SLC__1SDV_20220525T182001_20220525T182028_043371_052DE0_1F8C	SLC	25/05/2022	74	43371
S1A_IW_SLC__1SDV_20220712T182005_20220712T182032_044071_0542B4_6AB4	SLC	12/07/2022	74	44071
S1A_IW_SLC__1SDV_20220829T182008_20220829T182034_044771_0558A5_356C	SLC	29/08/2022	74	44771

Nombre	Fechas	Linea base perpendicular, Bp, (m)
Coh1	25/05/2022 & 12/07/2022	61.7
Coh2	12/07/2022 & 29/08/2022	5.95
Coh3	25/05/2022 & 29/08/2022	66.4



La metodología seguida en el procesado de las imágenes se resume en el diagrama de flujo siguiente.

El corregistro de las imágenes es la alineación de las imágenes maestra y esclava; los píxeles de las imágenes esclavas corresponden a los de la maestra y representan un área idéntica.

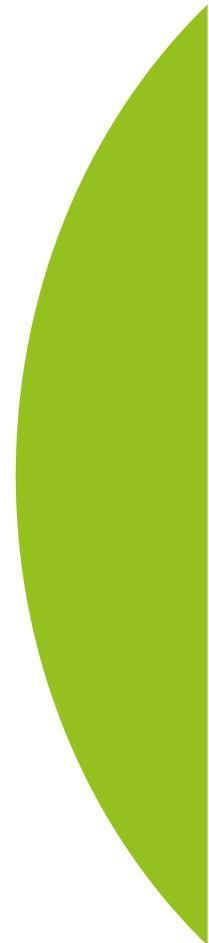
Al aplicar el operador “Multilook”, reducimos el ruido de moteado inherente que aparece originalmente en las imágenes SAR y obtendremos píxeles cuadrados. Este operador reduce la resolución de la imagen desde los 10 m originales a 25 m.

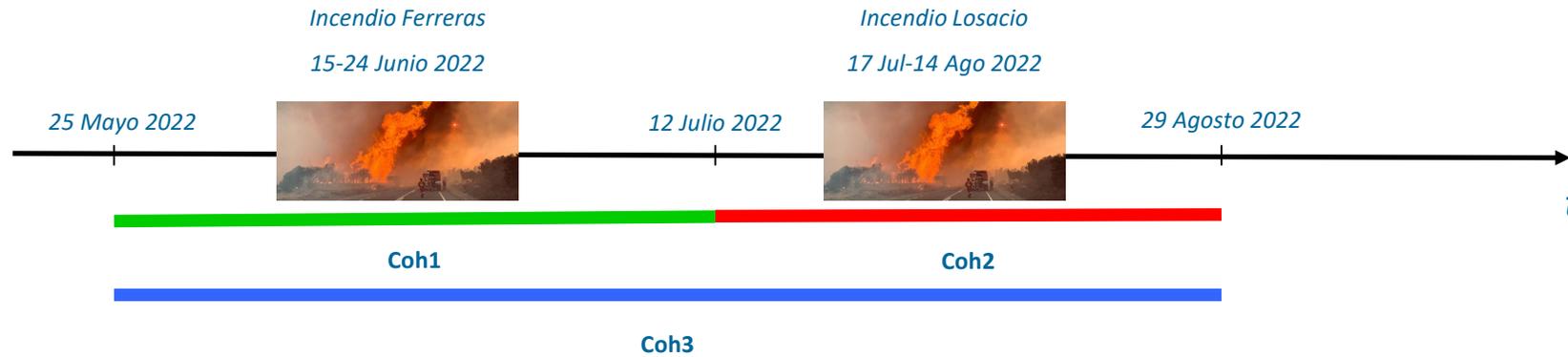
Con la geocodificación transformamos las coordenadas imagen de los píxeles en coordenadas geográficas generando una ortoimagen de coherencia como producto de salida. En este proceso utilizamos como modelo del terreno el SRTM de 30 m.



03

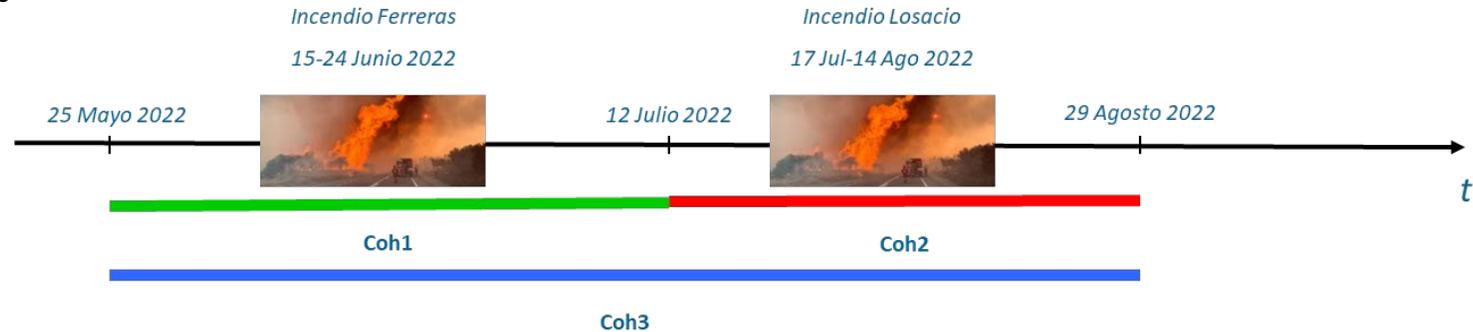
Resultados



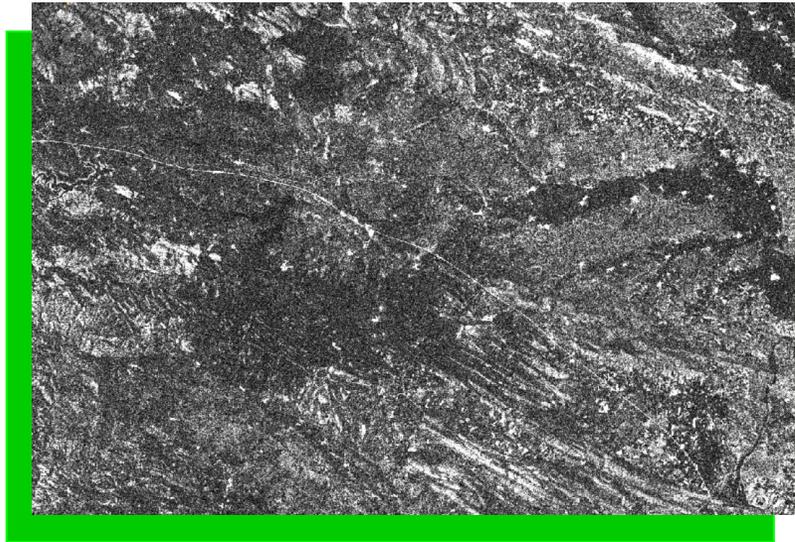


Como dijimos anteriormente, el incendio de Ferreras se desarrolló entre el 15 y el 24 de junio y el de Losacio entre el 17 de julio y el 14 de agosto, por ello generamos las siguientes imágenes de coherencia con el fin de detectar cambios:

- Coherencia 1 (Coh1): combinación de las imágenes SLC del 25 de mayo y del 12 de julio.
- Coherencia 2 (Coh2): combinación de las imágenes SLC del 12 de julio y del 29 de agosto.
- Coherencia 3 (Coh3): combinación de las imágenes SLC del 25 de mayo y del 29 de agosto.

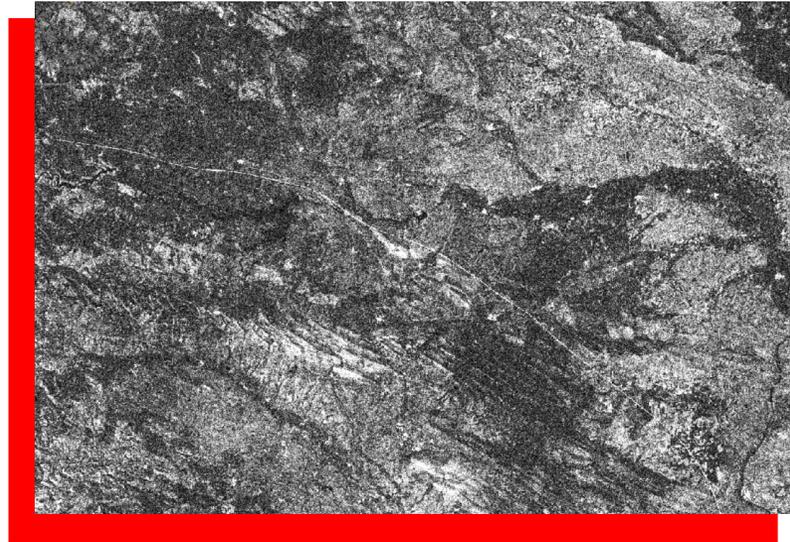


Coherencia #1



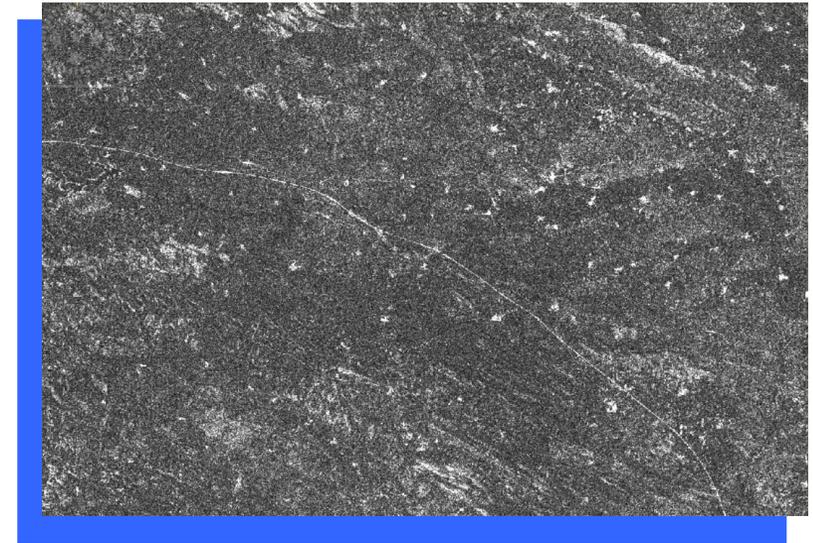
$B_p = 61.7\text{ m}$

Coherencia #2



$B_p = 5.95\text{ m}$

Coherencia #3

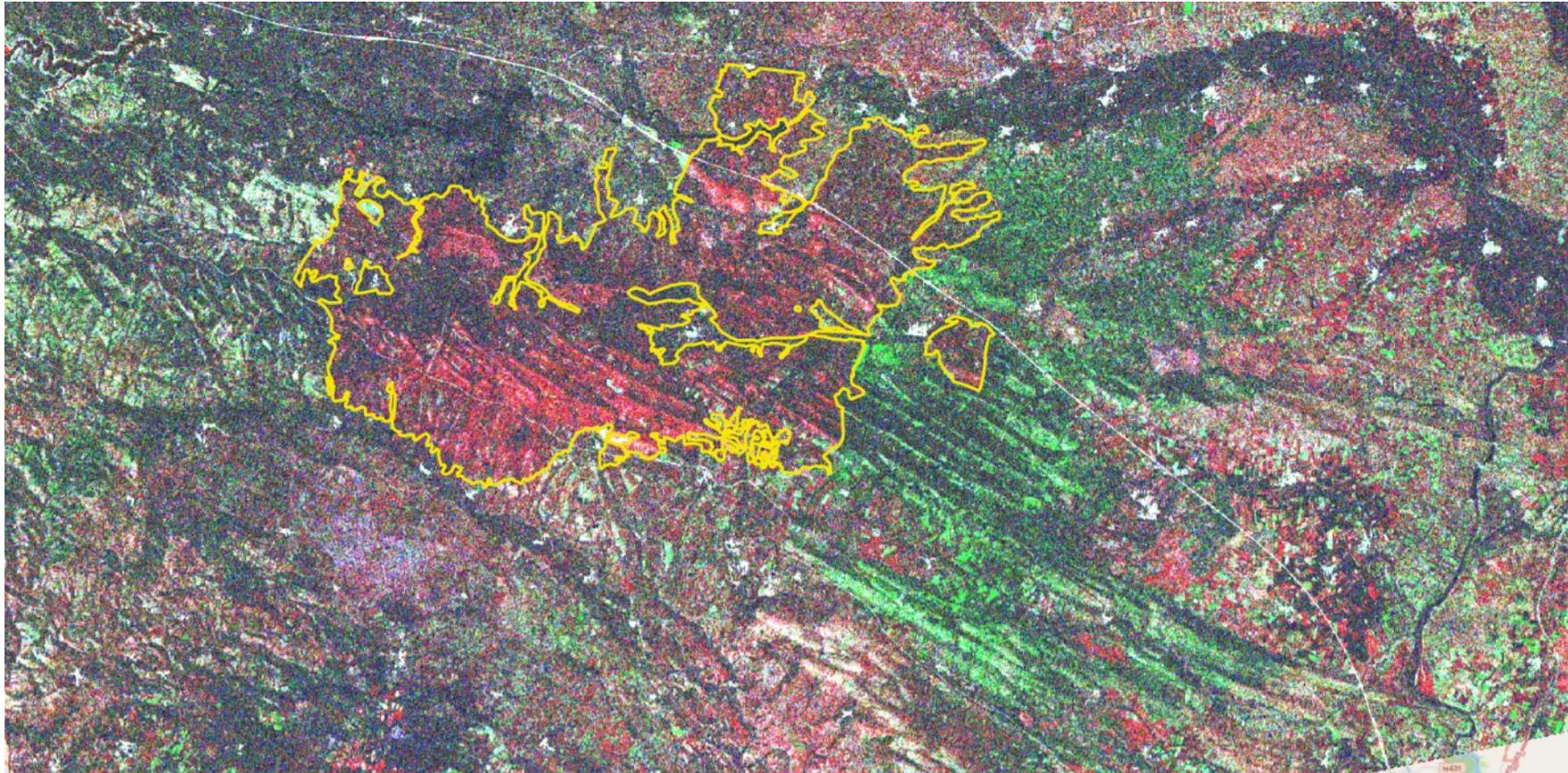


$B_p = 66.4\text{ m}$

Análisis visual preliminar de cada una de las imágenes de coherencia obtenidas, buscando las zonas donde la coherencia estaba más degradada y evaluando qué par de imágenes aportaba la máxima información.

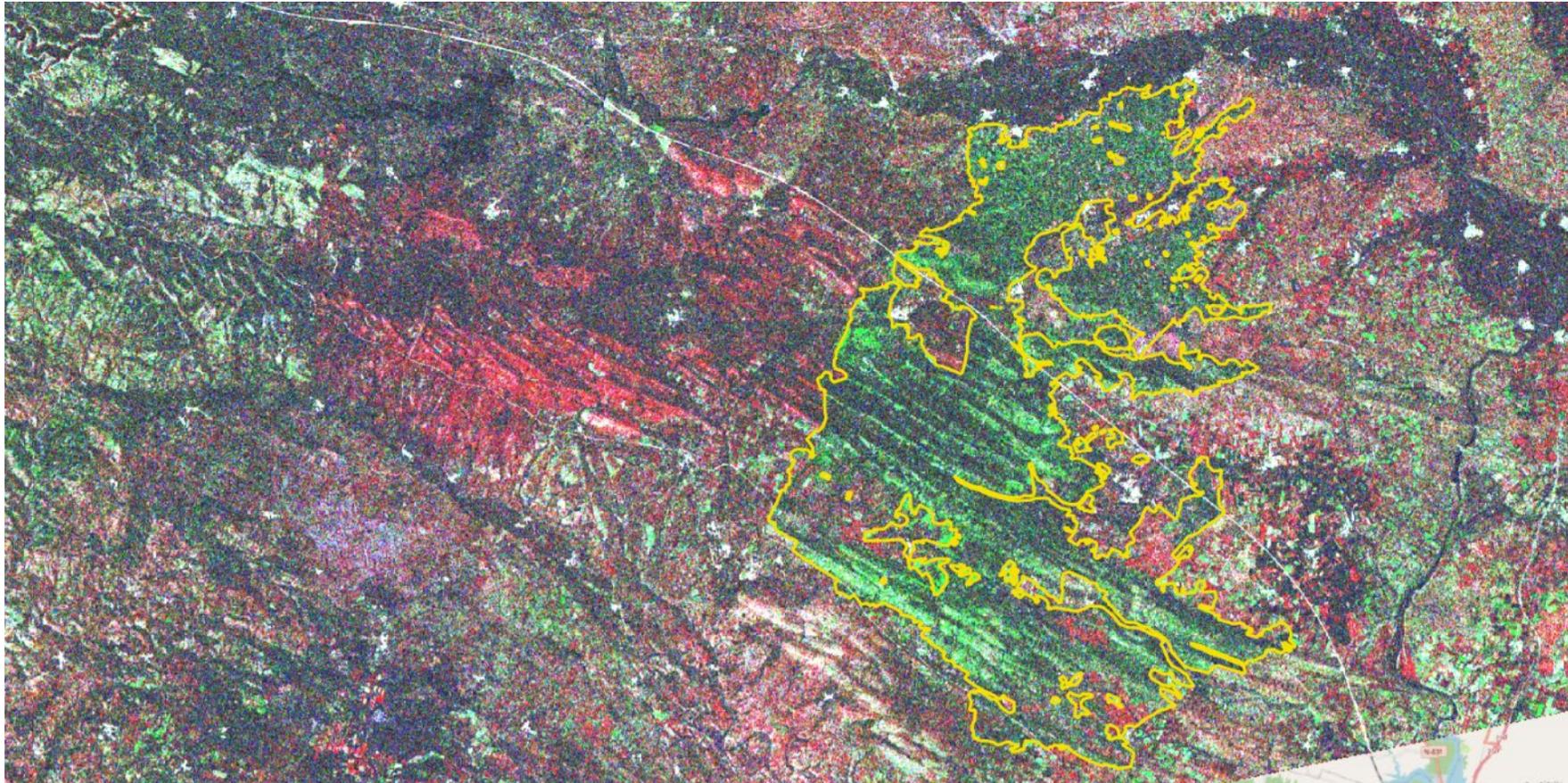


Imagen multitemporal (RGB) realizada a partir de las tres imágenes de coherencia (Coh2 al canal rojo, Coh1 al canal verde y Coh3 al canal azul). Esta combinación fue la mejor para permitir un mejor análisis visual con el fin de fijar los límites exteriores del área quemada. En esta imagen, los colores rojos se deben a la alta coherencia presente en el área quemada por el incendio de Ferreras, en la imagen Coh2.



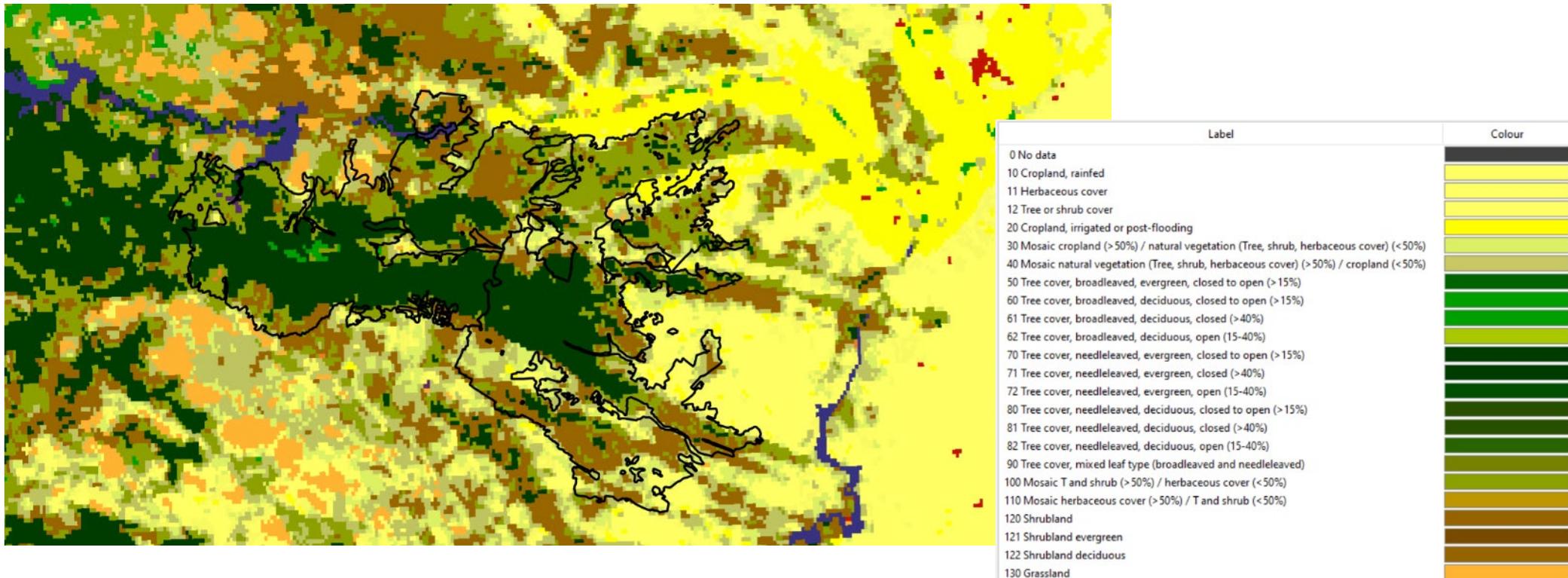


Mientras que los colores verdes se deben a la alta coherencia presente en el área quemada por el incendio de Losacio, en la imagen Coh1. En la otra imagen de coherencia, Coh3, obtenida a partir de las imágenes antes y después de ambos incendios forestales, la coherencia es baja en el área quemada total.





- En el caso del incendio de Ferreras y Sarracín, el número de hectáreas afectadas, según los datos proporcionados por Sentinel-2 (26 de junio de 2022), dentro del Programa Copérnico, es de 27242 ha con algún grado de severidad, con un perímetro que englobaría 29670 ha.
- En el caso del incendio de Losacio, las primeras estimaciones arrojaron una superficie afectada de entre 32000 y 34000 ha. De acuerdo con los datos proporcionados por Sentinel-2 (4 de agosto de 2022), dentro del Programa Copérnico, el área afectada es de 31473,1 ha, con un perímetro que englobaría 35960 ha.





04

Conclusiones





- Con una imagen de coherencia multitemporal se detectan los cambios ocurridos en una escena, respecto de las distintas fechas, y es posible conocer la causa principal con cierta fidelidad.
- Con este tipo de metodología, se requiere un mapa de usos del suelo reciente para conocer el número y tipo de clases afectadas.
- La clasificación automática no delimita eficientemente el perímetro del área quemada, aunque ayuda a conocer los lugares donde se han podido producir cambios naturales o no naturales.
- La disponibilidad de imágenes, especialmente en lo que respecta a la línea base perpendicular, es una limitación.
- El mejor análisis con las imágenes de coherencia multitemporal es el visual.
- Este tipo de metodología no puede funcionar sola, sino como complemento de otra. Sin embargo, si no se dispone de datos ópticos, puede funcionar como una buena primera aproximación.

#CONAMA2024

[Arial Negrita 10] Título del apartado

¡Gracias! 